

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Jacques SIMON

1^{re} THÈSE. — Le facteur de contraste, sa détermination visuelle et son application en métrologie.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 17 Juin 1960 devant la Commission d'examen.

MM. ARNULF
JACQUINOT
MARÉCHAL

Président.

} *Examineurs.*

Éditions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*

3 et 5, boulevard Pasteur — 165, rue de Sèvres

PARIS (15^e)

1961



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41553814_0053

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Nom du Candidat : SIMON.

Prénom : Jacques.

Date de la soutenance : 17 Juin 1960.

Numéro d'ordre : N° 649.

1

SIMON (Jacques). — Le facteur de contraste, sa détermination visuelle et son application en métrologie. — *Paris*, Éditions de la Revue d'Optique, 1961, in-8°, 18 p., 16 fig.

Th. Sc. Phys. Paris. 1961. N° 649.

2

SIMON (Jacques). — Le facteur de contraste, sa détermination visuelle et son application en métrologie. — *Paris*, Éditions de la Revue d'Optique, 1961, in-8°, 18 p., 16 fig.

Th. Sc. Phys. Paris. 1961. N° 649.

3

SIMON (Jacques). — Le facteur de contraste, sa détermination visuelle et son application en métrologie. — *Paris*, Éditions de la Revue d'Optique, 1961, in-8°, 18 p., 16 fig.

Th. Sc. Phys. Paris. 1961. N° 649.

4

SIMON (Jacques). — Le facteur de contraste, sa détermination visuelle et son application en métrologie. — *Paris*, Éditions de la Revue d'Optique, 1961, in-8°, 18 p., 16 fig.

Th. Sc. Phys. Paris. 1961. N° 649.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Jacques SIMON

1^{re} THÈSE. — Le facteur de contraste, sa détermination visuelle et son application en métrologie.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 17 Juin 1960 devant la Commission d'examen.

MM. ARNULF
JACQUINOT
MARÉCHAL

Président.

} *Examineurs.*



Éditions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*

3 et 5, boulevard Pasteur — 165, rue de Sèvres

PARIS (15^e)

1961

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PROFESSEURS

Doyen J. PÉRÈS

G. JULIA	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	BRELOT	T	Calcul différentiel.
DE BROGLIE	T	Théories physiques.	NORMANT	T	Synthèse organique.
PRENANT	T	Anatomie et histologie comparées.	BENARD	T	Chimie minérale.
PÉRÈS	T	Mécanique des fluides et applications.	BUVAT	T	Botanique (E. N. S.).
BARRABÉ	T	Géologie structurale et Géologie appliquée.	DUGUÉ	T	Statistiques mathématiques.
BOURCART	T	Géographie physique et Géologie dynamique.	GÉLOSO	T	Chimie (S. P. C. N.).
PLANTEFOL	T	Botanique.	SOULAIRAC	T	Psychophysiologie.
GRASSÉ	T	Evolution des êtres organisés.	ULRICH	T	Physiologie végétale.
PREVOST	T	Chimie organique.	MARÉCHAL	T	Optique théorique et appl.
BOULIGAND	T	Application de l'analyse à la géométrie.	KIRRMANN	T	Théories chimiques.
CHAUDRON	T	Chimie appliquée.	CHADEFAUD	T	Botanique.
WYART	T	Minéralogie.	M ^{lle} LE BRETON	T	Physiologie générale.
TEISSIER	T	Zoologie.	SALEM	T	Mathématiques générales.
MANGENOT	T	Biologie végétale.	LELONG	T	Mathématiques générales.
P. AUGER	T	Physique quantique et Relativité.	DEVILLERS	T	Anatomie et Histologie comparées.
MONNIER	T	Physiologie générale.	EHRESMANN	T	Topologie algébrique.
PIVETEAU	T	Paléontologie.	FRANÇON	T	Physique (S. P. C. N.).
ROCARD	T	Physique (E. N. S.).	GLANGEAUD	T	Géographie physique et Géologie dynamique.
H. CARTAN	T	Mathématiques (E. N. S.).	GODEMENT	T	Mathématiques (M. G. P.).
LAFFITTE	T	Chimie Générale.	PISOT	T	Techniques mathématiques de la Physique.
FAYARD	T	Géométrie supérieure.	ROCH E.	T	Géologie.
COULOMB	T	Physique du Globe.	SCHATZMAN	T	Astrophysique.
M ^{lle} COUSIN	T	Biologie animale (S.P.C.N.).	TERMIER	T	Paléontologie stratigraphique.
CHRÉTIEN	T	Chimie minérale.	ZAMANSKY	T	Mathématiques générales.
DRACH	T	Zoologie.	LENNUIER	T	Physique (M. G. P.).
KASTLER	T	Physique (E. N. S.).	RIZET	T	Génétique.
EPHROSSI	T	Génétique.	ROUTHIER	T	Géologie appliquée.
WURMSER	T	Biologie physicochimique.	M ^{me} TONNELAT	T	Relativité.
RIVIÈRE	T	Géologie (S. P. C. N.) Orsay.	KASTMIER	T	Mathématiques (M. P. C.).
GAUTHERET	T	Biologie végétale (P. C. B.).	SOUCHAY	T	Chimie générale.
LUCAS	T	Recherches Physiques.	AIGRAIN	T	Electrotechnique générale.
A. THOMAS	T	Biologie cellulaire.	BRUSSET	T	Chimie minérale.
ARNULF	T	Optique appliquée.	M. LEVY	T	Physique théorique des hautes énergies (Orsay).
M. MORAND	T	Enseignement de Physique.	M ^{me} CHAIX	T	Chimie biologique.
SOLEILLET	T	Physique (P. C. B.).	M ^{me} HUREL-PY ..	T	Biologie végétale (P. C. B.).
FORTIER	T	Mécanique expérimentale des fluides.	PIAUX	T	Chimie (M. P. C.).
DANJON	T	Astronomie.	BRUN	T	Mécanique expérimentale des fluides.
PETIT	T	Biologie maritime.	LEDERER	T	Chimie biologique.
QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmosphérique.	M ^{me} DUBREIL	T	Mathématiques.
GALLIEN	T	Embryologie.	M ^{me} LELONG	T	Mathématiques (E. N. S.).
EICHHORN	T	Biologie végétale (S.P.C.N.).	BELLAIR	T	Géologie (S. P. C. N.).
DE CUGNAC	T	Biologie végétale (S.P.C.N.).	COTTE	T	Physique (Orsay).
M ^{lle} CAUCHOIS	T	Chimie physique.	DUBOIS J. E.	T	Chimie organique.
THELLIER	T	Physique du Globe.	LAMOTTE	T	Zoologie (E. N. S.).
L'HÉRITIER	T	Génétique.	MICHEL André ..	T	Chimie (S. P. C. N.).
GRIVET	T	Radioélectricité.	OLMER	T	Energétique générale.
PONCIN	T	Mécanique générale.	ROUAULT	T	Physique générale.
DUBREIL	T	Arithmétique et Théorie des nombres.	GAUTHIER	T	Mécanique appliquée.
QUELET	T	Chimie organique.	BARCHEWITZ	T	Chimie Physique.
CAIGNARD	T	Géophysique appliquée.	BROSSEL	T	Physique atomique.
CHAMPETIER	T	Chimie macromoléculaire.	BUSER	T	Biologie comparée.
CUVILLIER	T	Micropaléontologie.	CAMUS	T	Biologie vég. (3 ^e Cycle).
JUNG	T	Pétrographie.	CASTAING	T	Physique générale.
TRILLAT	T	Microscopie et diffraction électronique.	CURIEN	T	Minéralogie et Cristallogr.
WIEMANN	T	Chimie organique et struct.	MOYSE	T	Physiologie végét. (Orsay).
JACQUINOT	T	Spectroscopie et physique céleste.	PANNETIER	T	Chimie (S. P. C. N.).
VASSY	T	Physique de l'atmosphère.	POSSOMPES	T	Zoologie.
DESTOUCHES	T	Théories Physiques.	PULLMANN	T	Chimie théorique.
PRUVOST	T	Géologie.	TEILLAC	T	Physique nucléaire et Radioactivité (Orsay).
AMIEL	T	Chimie générale.	TONNELAT	T	Biologie physicochimiques.
HOCART	T	Minéralogie.	VILLE	T	Econométrie.
J.-P. MATHIEU	T	Physiques (Orsay).	WILLEMART	T	Chimie (P. C. B.).
COUTEAUX	T	Biol. animale (P. C. B.).	DODÉ	T	Chimie (S. P. C. N.) Orsay.
MAY	T	Zoologie (Orsay).	FREYMANN	T	Physique générale.
CHOQUET	T	Théorie des fonctions et Topologie.	GUINOCHET	T	Biologie vég. (Orsay).
FELDMANN	T	Biologie végétale marine.	ROLLET	T	Chimie (P. C. B.).
GUINIER	T	Physique des Solides.	M ^{lle} JOSIEN	T	Chimie (P. C. B.).
JOST	T	Physiologie comparée.	CHEVALLEY	T	Géométrie algébrique et théorie des groupes.
FORTET	T	Calcul des Prob. et physique mathématique.	ARNOULT	T	Electronique.
SCHWARTZ	T	Calcul diff. et intégral.	CHAPELLE	T	Physique (M. P. C.) (Orsay).
CHOUARD	T	Physiologie végétale.	DELANGE	T	Mathématiques (Orsay).
MALAVARD	T	Aviation.	DENY	T	Mathématiques (M. G. P.).
			GERMAIN	T	Mécanique théorique des fluides.
			LUCAS G.	T	Géologique.
			ALLARD	T	Chimie Physique.
			BERTHELOT	T	Physique nucléaire et Radioactivité.

BRICARD		Météorologie et Physique de l'Atmosphère.	BERTEIN.....	Electronique.
M ^{me} ALBE-FESSARD		Psychophysiologie.	BOUSSIÈRES	Chimie des Radioéléments.
FRIEDEL.....		Physique des Solides.	M ^{me} COUTURE....	Physique (P.C.B.).
M. JULIA		Etude des molécules organiques complexes.	ELLENBERGER	Géologie structurale et Géologie appliquée.
LENDER		Biologie animale (S.P.C.N.). (Orsay).	FRANC.....	Biologie Animale.
MAGAT.....		Physico-chimie des rayonnements.	SCHNELL.....	Botanique tropicale.
M ^{lle} QUINTIN	T	Electrochimie.	STOLKOWSKI.....	Physiologie générale.
MONOD	T	Chimie du métabolisme.	ACHER	Chimie biologique (Orsay).
BENOIT	T	Physiologie animale.	BAUDOIN.....	Biologie animale (P.C.B.).
DE POSSEL	T	Analyse numérique.	BEAUMONT	Biologie animale (S.P.C.N.).
CHARLOT.....	T	Chimie analytique.	BLAMONT	Géophysique Ionosphère.
HAISSINSKY	T	Radiochimie.	BOURREAU	Biologie végétale (S.P.C.N.). (Orsay).
LEMÉE	T	Physiologie (B.M.P.V.).	CURIE D.....	Physique (M. G. P.).
GUÉRIN	T	Chimie (M. P. C.).	DURAND-DELGA ..	Géologie.
CHATELET M.....		Chimie (S. P. C. N.).	FREON.....	Chimie (P. C. B.).
JEAN.....		Physique nucléaire et radio-activité.	HELLER.....	Physiologie végétale.
MATTLER		Physique (S. P. C. N.).	TORTRAT	Calcul des Probabilités.
MICHEL Louis ...		Physique théorique des hautes énergies.	CAILLEUX	Géologie (S. P. C. N.).
RUMPF		Chimie (P. C. B.).	MAGNAN	Physique (M. P. C.).
BERGERARD		Zoologie (Orsay).	DAUDEL	Mécanique ondulatoire appliquée à la chimie théorique et à la Physique nucléaire.
			M ^{lle} FOURCROY...	Biologie végétale (S.P.C.N.).

Secrétaire Général C. MONIER

LE FACTEUR DE CONTRASTE, SA DÉTERMINATION VISUELLE ET SON APPLICATION EN MÉTROLOGIE

par Jacques SIMON

SOMMAIRE. — *Les dispositifs usuels destinés à la mesure du facteur de contraste des instruments d'optique sont basés sur la détermination photoélectrique du contraste d'une image.*

On peut, comme l'a suggéré M^r Arnulf, mettre à profit l'aptitude de l'œil à déceler de légères différences de contrastes entre deux plages juxtaposées pour aboutir à un appareillage simple et précis. Il est toutefois nécessaire de faire varier continuellement le contraste de l'une des plages. Nous proposons à cet effet deux procédés permettant d'obtenir une variation connue du contraste d'une image sans en modifier l'éclairement moyen. Les avantages respectifs des différents montages sont discutés. Quelques courbes de modulation d'objectifs courants illustrent l'influence de la diaphragmation et du défaut de mise au point sur la qualité de l'image.

Cette dernière étude aboutit à la proposition d'une nouvelle technique d'exécution des pointés ; en effet, la précision des pointés longitudinaux est généralement limitée par le fait que l'on recherche le maximum de netteté d'une image, dont la variation est stationnaire par rapport à la mise au point. Nous proposons une méthode basée sur un effet du premier ordre, utilisant l'égalité de contraste des images de deux mires périodiques décalées en profondeur.

SUMMARY. — *Conventional devices suitable for measuring the contrast factor of optical instruments are based on a photoelectric determination of the image contrast.*

As was suggested by Mr Arnulf, the ability of the eye to detect slight contrast differences between two adjacent fields may be used and results in a simple accurate apparatus. It is essential, however, to continuously vary the contrast of one field. To this end, two methods are presented making it possible to get a known change in the contrast of an image in which the mean illumination is not altered. The advantages of various arrangements are shown. Some modulation curves of ordinary lenses illustrate the effect of a stop or a focus shift on the image quality.

The latter study leads to a new technique of optical settings : indeed the accuracy of longitudinal settings is generally limited by the fact that one looks for a maximum in sharpness which exhibits a stationary variation with respect to focus shift. The method presented here is based on a first order effect using the equal contrast of images given by two periodical test objects shifted in depth.

I. Le facteur de contraste des systèmes optiques

1. Position du problème. — Le but de cette étude est l'analyse des caractéristiques de l'élément optique faisant partie d'une chaîne complexe destinée à la transmission des images. Chaque élément (chaque maillon de la chaîne) produit une dissipation du signal. Le problème se pose de savoir quelle sera la réponse ou l'image donnée par la chaîne. Dans le cas d'une chaîne à éléments linéaires, les

différentes causes d'élargissement du signal ajoutent leur effets. La réponse pour un objet de forme impulsionnelle est obtenue en effectuant une opération de convolution sur les différentes fonctions de dissipation de l'énergie :

$$D = D_1 \star D_2 \star \dots \star D_n .$$

L'introduction de la transformation de Fourier, désignée sous la notation T , permet d'écrire le produit de composition sous la forme d'un produit simple [1]

$$T(D) = \prod_{i=1}^{i=n} T(D_i) ,$$

où

$$T[D_1(x)] = g(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} D_1(x) \exp(i2\pi x) dx .$$

$g(x)$ est le spectre de la fonction de dissipation de l'énergie.

L'influence des différentes causes de dégradation de l'image est représentée simplement dans l'espace de Fourier. La réponse spectrale de la chaîne s'obtient en effectuant le produit des réponses des maillons constitutants.

Notre étude se limite à l'élément optique. Nous considérons l'ensemble des causes provoquant l'élargissement de l'image d'un point-objet : aberrations, diffraction, diffusion, etc.

D'autre part, l'étude des objectifs est effectuée en lumière incohérente, condition habituelle d'utilisation des objectifs de prise de vue. Le critère de qualité obtenu reste valable dans un petit domaine du champ au voisinage duquel a été effectuée la mesure (condition de linéarité). Mais il évolue avec la mise au point, l'angle de champ, l'ouverture, la longueur d'onde utilisée et l'azimut.

2. Rappel de quelques résultats relatifs à la loi de filtrage des fréquences spatiales dans les instruments d'optique. — Si $F(\beta', \gamma')$ représente la répartition des amplitudes complexes sur une sphère de référence et limitée au contour de la pupille de sortie, l'on peut démontrer [2] que la loi de filtrage des fréquences spatiales est obtenue en effectuant l'autocorrélation de la fonction $F(\beta', \gamma')$.

Si nous normalisons la loi de filtrage de l'instrument de façon à obtenir pour transmission maximale la valeur unitaire, nous obtenons le facteur de transmission des fréquences spatiales

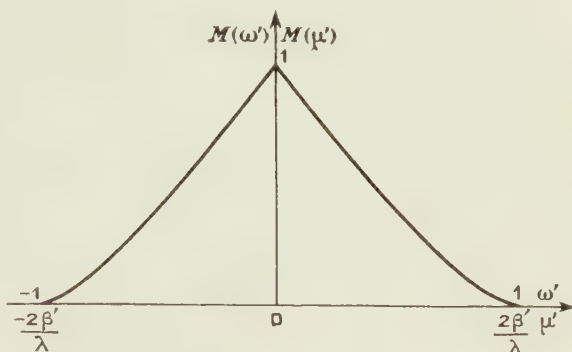
$$M(\mu', \nu') = \frac{\iint F(\beta', \gamma') F^*(\beta' - \lambda\mu', \gamma' - \lambda\nu') d\beta' d\gamma'}{\iint F(\beta', \gamma') F^*(\beta', \gamma') d\beta' d\gamma'} .$$

Dans cette expression, β' et γ' sont les demi-angles d'ouverture image suivant deux directions perpendiculaires, μ' et ν' les fréquences spatiales correspondantes, λ la longueur d'onde de la lumière utilisée.

Le facteur de transmission des fréquences spatiales est en général un nombre complexe :

$$M(\mu', \nu') = |M(\mu', \nu')| \exp i\theta(\mu', \nu') .$$

FIG. 1. — Section méridienne suivant l'axe des μ' de la fonction de transmission des fréquences spatiales; la représentation s'effectue parfois en utilisant la fréquence spatiale réduite $\omega' = \lambda\mu'/2\beta'$.



$\theta(\mu', \nu')$ représente le glissement de phase; si la répartition des amplitudes pupillaires est symétrique par rapport au rayon moyen passant par le centre de la pupille, $\theta(\mu', \nu')$ est identiquement nul.

Enfin, pour un objectif à pupille circulaire, parfaitement stigmatique et à transparence uniforme, la courbe représentative de la fonction de transmission des fréquences spatiales a l'allure suivante (fig. 1).

3. Principes des méthodes photoélectriques destinées à la mesure du facteur de transmission des fréquences spatiales. — Les montages réalisés correspondent le plus souvent au schéma ci-dessous.

Un photomultiplicateur placé derrière une fente fine analyse l'image d'une mire à transparence périodique (de préférence sinusoïdale) donnée par l'objectif étudié. Le courant électrique obtenu présente une composante alternative qui peut être amplifiée. L'amplitude de cette composante est proportionnelle à la fonction de modulation, ce qui permet la détermination de cette dernière à l'aide d'un micro-ampèremètre ou d'un oscillographe cathodique.

Le premier dispositif réalisé pour la mesure du facteur de transmission des fréquences spatiales semble être celui de O. H. Schade. Plusieurs autres dispositifs furent proposés utilisant des principes différents. Citons, par exemple, ceux qui furent mis au point en Allemagne par Lohmann et Rosenhauer, en Australie par Steel, en Grande-Bretagne par H. H. Hopkins, Kelsall et Birch, en France par P. Lacomme, au Japon par Mijamoto, en Suède par E. Ingelstam.

Les méthodes photoélectriques permettent des déterminations rapides et éventuellement des enregistrements. Elles nécessitent par contre l'emploi d'appareillages complexes et présentent de ce fait certains aléas.

II. La détermination visuelle du facteur de contraste

1. Principe d'une méthode de mesure visuelle du contraste. — Nous proposons d'utiliser l'œil pour effectuer la mesure du contraste d'une image. Si en effet l'œil n'est pas capable de chiffrer le contraste d'une image, il peut néanmoins apprécier avec une bonne précision l'égalité de contraste de deux champs juxtaposés. L'objet-test est constitué par une mire périodique de préférence sinusoïdale, l'objectif examiné en donne une image de contraste altéré; celle-ci est comparée

à une image étalon de même fréquence spatiale et de même éclairement moyen mais dont le contraste est variable à volonté. Il suffit de faire varier le contraste de l'image étalon, d'obtenir l'égalité des contrastes sur les deux champs photométriques pour déterminer le contraste de l'image donnée par l'objectif étudié.

Bien entendu, cette méthode visuelle est plus lente que les méthodes photoélectriques mais elle paraît plus sûre puisqu'elle permet en particulier de déceler très rapidement les défauts de réglage. Enfin sa précision est comparable à celle des méthodes photoélectriques.

Cette méthode présente les avantages suivants :

simplicité, l'organe de réglage est l'œil de l'observateur fonctionnant en appareil de zéro ;

précision, la précision est de l'ordre de 2 % ;

fidélité, le dispositif étant purement statique est de ce fait indéréglable.

Par contre, elle est entachée de certains défauts :

lenteur, la méthode visuelle exige d'effectuer plusieurs égalisations du contraste pour en obtenir une valeur sûre ;

la mesure du contraste n'est pas directe dans une des méthodes décrites ci-après.

Il reste à étudier un étalon de contraste permettant de réaliser une variation continue du contraste d'une image, sans en modifier l'éclairement moyen.

2. Procédés de gradation du contraste. — Nous décrirons successivement deux dispositifs pour faire varier le contraste d'une image sans en modifier l'éclairement moyen.

1. Dispositif photométrique. — A l'image d'un fond de luminance uniforme, nous superposons l'image d'une mire de contraste unité. La variation de contraste est obtenue à l'aide d'un dispositif à deux fentes (fig. 2) qui permet de maintenir constante la luminance moyenne.

La pupille limitant l'éclairement dans l'image de la mire est constituée par la fente 1. De même, la fente 2 limite l'éclairement de l'image du fond de luminance uniforme. L'élément A étant fixe, si nous déplaçons le cadre B, une augmentation de flux sur la voie 1 s'accompagne d'une diminution sur la voie 2. Etudions le fonctionnement d'un tel dispositif. Supposons que la mire-objet présente une loi de luminance.

$$L_z = L_1 (1 + \sin 2\pi v z) .$$

Soit x la largeur de la fente 1 et $2a - x$ celle de la fente 2 ; soit L_2 la luminance de la plage uniformément transparente et v la fréquence spatiale objet. Tout se passe comme si nous avions une mire-objet de luminance

$$L_z = \frac{x}{2a} L_1 (1 + \sin 2\pi v z) + \frac{L_2}{2a} (2a - x) .$$

$\sin 2\pi v z$ est en moyenne nul, d'où l'expression de la luminance moyenne

$$\bar{L}_z = L_1 \frac{x}{2a} + L_2 \frac{2a - x}{2a} .$$

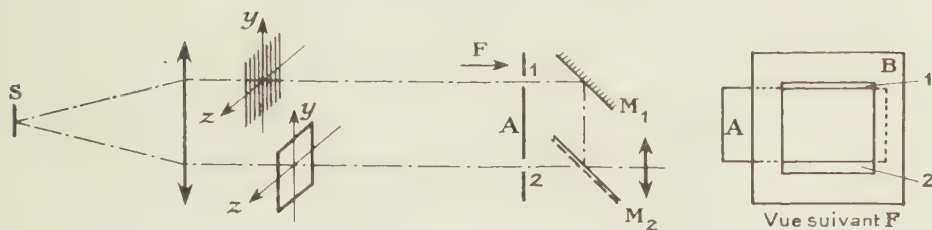


FIG. 2. — Schéma du montage.

Cette luminance moyenne sera indépendante de x pour $L_1 = L_2$.

L_1 et L_2 sont les luminances au niveau de l'objectif, c'est-à-dire compte tenu des pertes par réflexion et transmission sur les miroirs de renvoi M_1 et M_2 .

D'où l'expression de la luminance de l'objet

$$L_z = L_1 \left(1 + \frac{x}{2a} \sin 2\pi v z \right).$$

Pour connaître le contraste-image ⁽¹⁾, nous devons, en toute rigueur, tenir compte des pertes de contraste par diffraction dues à la longueur finie de la pupille de sortie de l'objectif.

$$M(v, x) = \begin{cases} \frac{x}{2a} \left(1 - \frac{\lambda |v|}{2\gamma_0} \right) & \text{pour } |v| \leq 2\gamma_0/\lambda \\ 0 & \text{pour } |v| > 2\gamma_0/\lambda \end{cases}$$

En fait, les pertes de contraste dues à la diffraction n'interviennent pas dans le domaine des basses fréquences.

Des mesures ont été effectuées à l'aide de ce dispositif, mais la lumière parasite produite par les imperfections des systèmes optiques dues au grand nombre de surfaces ont faussé les mesures des faibles contrastes. Ce dispositif dut être abandonné au profit d'une solution plus simple, basée sur les propriétés de la figure de diffraction donnée par une ouverture rectangulaire.

2. Gradation du contraste par diffraction. — On sait que dans un système optique fonctionnant en éclairage incohérent, le facteur de contraste s'exprime par la fonction d'autocorrélation de la pupille. Si l'on utilise un instrument stigmatique muni d'une pupille à transparence uniforme limitée à un contour C (ne présentant pas la symétrie de révolution) on peut, en particulier, obtenir une variation de la fonction d'autocorrélation en effectuant simplement une rotation du contour C (la direction des traits de la mire restant invariable). Il est évident que, dans ces conditions, le flux reste constant, ainsi que l'éclairement de l'image. On peut faire varier la modulation de l'image de référence sans en modifier l'éclairement moyen.

⁽¹⁾ Nous adopterons pour définition du contraste de l'image d'une mire-objet à transparence sinusoïdale et de contraste unité l'expression très symétrique

$$\Gamma = (E_M - E_m)/(E_M + E_m),$$

E_M étant l'éclairement maximum, E_m l'éclairement minimum, à fréquence constante. Nous emploierons indifféremment le terme contraste ou modulation car $\Gamma(v)$ représente l'expression de la fonction de modulation définie en [2].

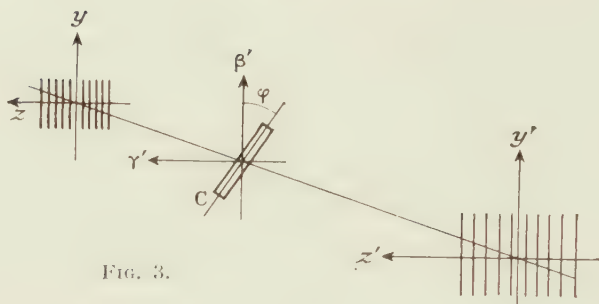


FIG. 3.

Soit une mire à transparence sinusoïdale définie par la relation $T(z) = 0,5 (1 + \sin 2\pi v z)$, où v est une fréquence spatiale, et soit un objectif optiquement parfait diaphragmé par une ouverture rectangulaire ; calculons la fonction de modulation $M(v', \varphi)$ pour une fréquence spatiale image v' et l'azimut φ formé par le grand côté du rectangle et la direction des traits de la mire (fig. 3) ; soit $F(\beta', \gamma')$ la répartition des amplitudes pupillaires sur la sphère de référence limitée au contour de la pupille C.

Le facteur de contraste s'exprime par la relation [2]

$$M(v', \varphi) = \frac{\iint F(\beta', \gamma') F^*(\beta', \gamma' - v'\lambda) d\beta' d\gamma'}{\iint F(\beta', \gamma') F^*(\beta', \gamma') d\beta' d\gamma'}.$$

L'objectif étant supposé parfait, la phase sur la pupille de sortie reste constante. Dans ce cas particulier, la fonction d'autocorrélation de $F(\beta', \gamma')$ représente la surface $S(v', \varphi)$ commune aux deux contours identiques C et C' (fig. 4), C' étant obtenu à partir de C par la translation $\lambda v'$ parallèle à l'axe de périodicité et le dénominateur étant la surface $S(0, \varphi)$ de la pupille de sortie. En désignant par k le rapport de la longueur à la largeur de la pupille et par $2\alpha'$ l'angle d'ouverture image suivant la largeur de la pupille rectangulaire, nous obtenons l'expression

$$M(v', \varphi) = \frac{S(v', \varphi)}{S(0, \varphi)} = \left(1 - \frac{\lambda |v'| \sin \varphi |}{2\alpha' k}\right) \left(1 - \frac{\lambda |v'| \cos \varphi |}{2\alpha'}\right).$$

La fonction d'autocorrélation est ainsi liée à l'angle de rotation de la pupille rectangulaire et il est évident géométriquement que cette surface commune pourra varier dans des proportions importantes.

Remarque. — Dans une représentation $M(v', \varphi)$ les courbes de la fonction M , φ étant constant, sont des portions de parabole (fig. 5). Nous rencontrons trois cas particuliers :

$$\varphi = 0, \quad M = 1 - (\lambda v' / 2\alpha'), \quad \text{portion de droite ;}$$

$$\varphi = \pi/2, \quad M = 1 - (\lambda v' / 2\alpha' k), \quad \text{portion de droite ;}$$

$$\varphi = \arctg k, \quad M = 1 - (\lambda v' / 2\alpha' \cos \varphi)^2,$$

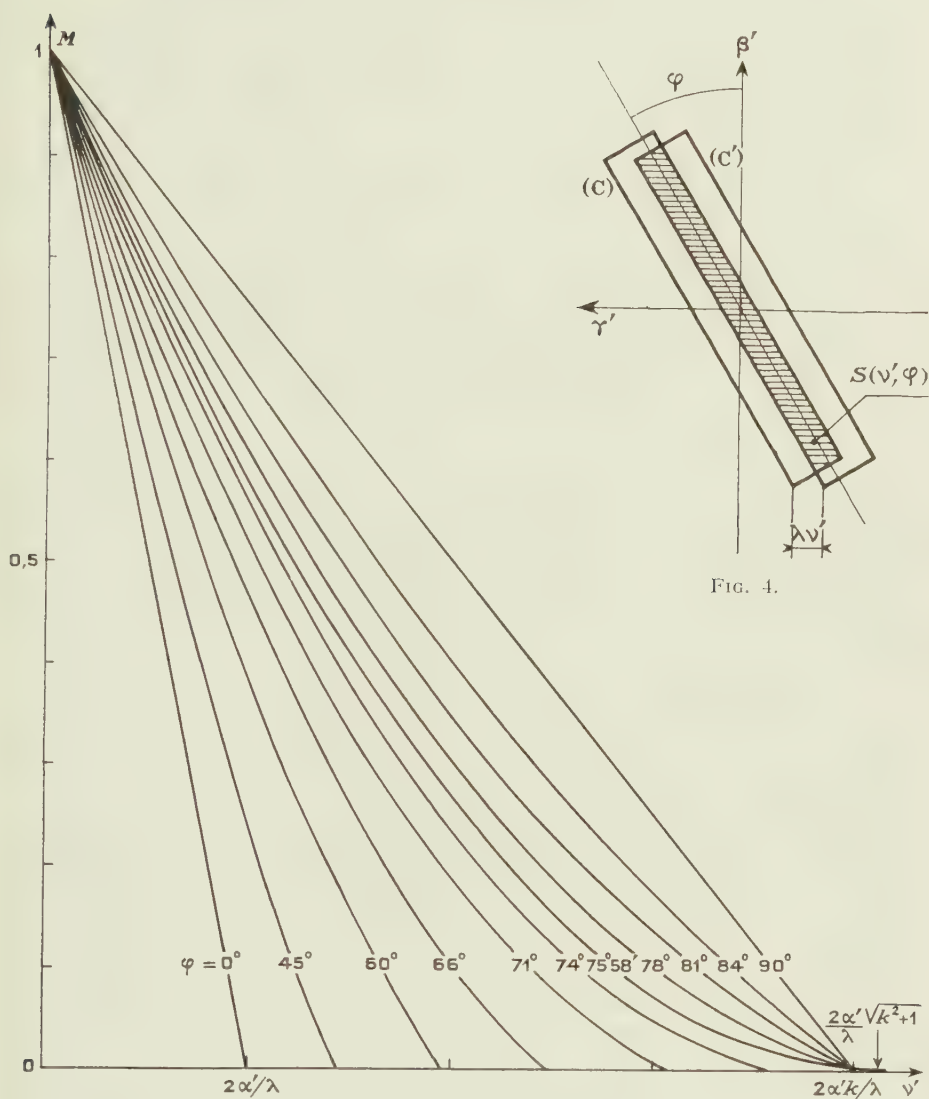
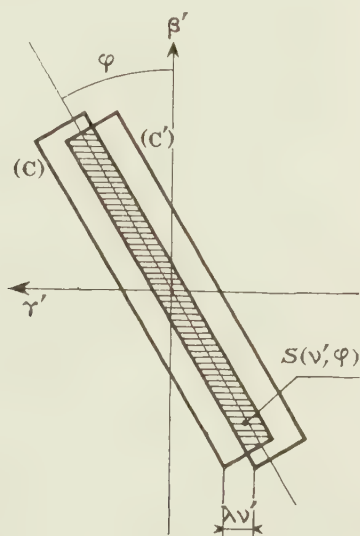

 FIG. 5. — Courbes $M(v', \varphi)$ pour $k = 4$, φ étant constant.


FIG. 4.

dans ce dernier cas la parabole est tangente à l'axe des v' .

Pour étudier la transmission des fréquences spatiales, nous avons utilisé les variations de M en fonction de φ , v étant constant ⁽²⁾.

⁽²⁾ Dans le cas particulier d'une ouverture carrée, les zéros de la fonction de modulation sont situés sur un carré; cette remarque peut être mise à profit pour obtenir un détramage en lumière incohérente; la pupille carrée est la forme optimale à donner à une pupille uniformément transparente pour parvenir à ce résultat, la mise au point étant parfaitement effectuée.

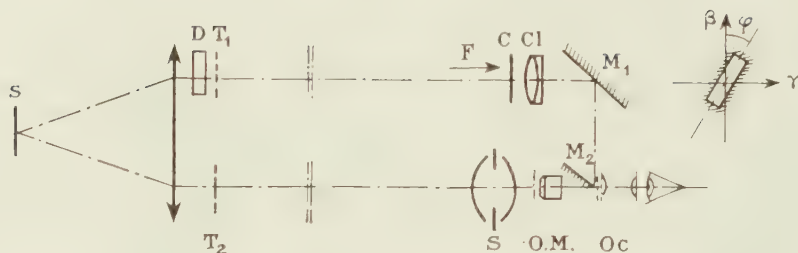


FIG. 6. — Dispositif pour la mesure du facteur de transmission des fréquences spatiales : *s*, source lumineuse ; *D*, coin et contre-coin ; *C*, plan de la pupille d'entrée ; *Cl*, objectif de Clairaut ; *O. M.*, objectif de microscope ; *S*, système à étudier ; *T*₁ et *T*₂, mires objets dont la loi de transmission est $T_z = 0,5 (1 + \sin 2\pi vz)$; *M*₁, *M*₂, miroirs plans ; *Oc*, oculaire. Dans le coin à droite, vue suivant *F* dans le plan de la pupille d'entrée *C*.

A) ENSEMBLE DU MONTAGE. — Soit un objectif *S* à étudier et un système de référence ; on s'arrange pour que les images données par les deux systèmes présentent la même fréquence spatiale v' ainsi que le même éclairement moyen.

En utilisant le dispositif à rotation de pupille on peut faire varier à volonté le contraste de l'image de comparaison, ce qui permet d'obtenir l'égalité de contraste des deux plages juxtaposées.

Nous utilisons à cet effet deux trajets (fig. 6).

Le trajet de référence à modulation variable (trajet supérieur) est composé d'un objectif de Clairaut travaillant à très faible ouverture (cet objectif peut être considéré comme parfait) ; il est diaphragmé par une ouverture rectangulaire et la mesure de l'angle de rotation φ permet d'en déduire le facteur de modulation.

Le trajet inférieur comporte l'objectif à étudier *S* dont l'image est agrandie par un excellent objectif de microscope. Les deux images données par les voies (supérieure et inférieure) sont juxtaposées à l'aide d'un miroir plan *M*₂ à arête vive placé dans le plan des images. Les mires présentent une loi de transmission $T(z) = 0,5 (1 + \sin 2\pi vz)$.

Le montage présente d'autre part les particularités suivantes : nous utilisons deux mires identiques et la longueur focale de l'objectif de Clairaut *Cl* est telle que les grandissements des deux voies sont égaux.

Un dispositif *D* de coin et contre-coin placé derrière l'une des mires permet d'obtenir l'égalité des intensités moyennes quelle que soit l'ouverture du système étudié.

Nous utilisons la même source sur les deux trajets ; on élimine ainsi les fluctuations de luminance dans le temps.

Le rapport des ouvertures condenseur-objectif est suffisamment grand pour considérer la lumière comme incohérente.

L'oculaire est choisi de façon à obtenir une résolution satisfaisante de la mire.

B) DOMAINE DES BASSES ET MOYENNES FRÉQUENCES. — Le problème se pose d'étendre aux basses et moyennes fréquences le dispositif utilisé pour mesurer la transmission des hautes fréquences.

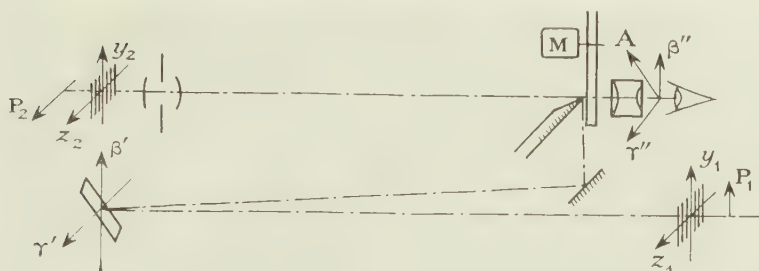


FIG. 7. — Schéma du dispositif destiné à la mesure du facteur de contraste dans le domaine des basses et moyennes fréquences. Le trajet de référence est constitué par la partie inférieure du montage ; il comprend un miroir sphérique diaphragmé sur sa face réfléchissante par une ouverture rectangulaire. Le trajet supérieur comprend l'objectif étudié.

Pour une pupille de sortie supérieure à 0,7 mm les imperfections de l'œil [3] rendent illusoire la méthode précédente, si l'on ne prend pas certaines précautions.

En effet, pour obtenir une variation de contraste importante dans les basses fréquences, nous sommes conduit à utiliser une fente allongée ; les pupilles de sortie données par le système de référence et par l'objectif étudié sont très différentes, ce qui peut introduire des erreurs importantes.

Pour éviter la diaphragmation aux pupilles, nous utilisons un verre dépoli tournant placé dans le plan de formation des images à comparer (fig. 7).

Le montage destiné à la mesure des basses et moyennes fréquences est constitué de différentes parties.

a) *Le système de référence.* — L'image étalon est donnée par un excellent miroir concave recouvert d'une couche d'aluminium ; ce dernier est diaphragmé par une ouverture rectangulaire dont l'angle φ formé par le grand côté du rectangle et les traits de la mire est mesurable à l'aide d'un dispositif annexe (fig. 8). Dans les expériences poursuivies, le miroir avait 2 800 mm de rayon, le rapport k de la longueur à la largeur de la fente était de 33, et la longueur de la fente de 60 mm.

b) *L'objet-test* est constitué par la figure de moiré obtenue en croisant deux éléments de trame de photogaveur ; ce dispositif permet d'obtenir une très grande gamme de fréquences spatiales en agissant sur un système mécanique simple, commandant l'angle des deux trames composantes. D'autre part, cette mire présente l'avantage d'être voisine de la mire sinusoïdale idéale.

c) *L'objectif examiné* travaille en objectif de projection. Une figure de moirés analogue à celle utilisée sur le dispositif de mesure est projetée dans le plan-objet de l'objectif à l'aide d'un bon objectif métallographique de microscope travaillant à l'envers (fig. 9). L'image aérienne obtenue est projetée sur le champ photométrique.

d) *Champ photométrique.* — Un ensemble de deux miroirs plans placé sur la référence permet de juxtaposer les deux champs-objets considérés. L'observation est effectuée à l'aide d'un oculaire de faible puissance. Le système d'éclairage est le même sur les deux voies. Nous utilisons une lampe à vapeur de mercure, dont



FIG. 8. — Objectif de référence à contraste variable.

la lumière est filtrée puis polarisée à l'aide des polaroïds P_1 et P_2 (fig. 7). Un troisième filtre polarisant placé dans le plan de la pupille de sortie joue le rôle d'analyseur et permet le réglage des intensités moyennes sur les trajets. L'égalité des fréquences spatiales est obtenue en agissant sur une des deux figures de moiré ; enfin, pour obtenir l'égalité des contrastes sur les deux plages, il suffit d'agir sur la pupille rectangulaire.

De l'angle de rotation φ , de la fréquence spatiale utilisée ν et connaissant la longueur d'onde émise, l'on en déduit le facteur de contraste de l'objectif $M(\nu')$.

3. Quelques précautions à réaliser pour effectuer des mesures correctes. —

1. Conditions imposées par l'œil. — Nous nous plaçons au voisinage du maximum de la courbe d'efficacité lumineuse. Les conditions d'appréciation du contraste seront optima pour un champ étendu, une luminance suffisante et surtout une limite de séparation des deux demi-champs très étroite [4, 5].

Dans le premier dispositif de gradation de contraste par diffraction, l'observateur utilise deux pupilles de sortie : d'une part la pupille correspondant à l'objectif étudié, d'autre part la pupille de forme rectangulaire donnée par la référence.

Nous choisirons un oculaire suffisamment puissant pour obtenir des pupilles de sortie inférieures à 0,7 mm.

L'effet Stiles-Crawford ne modifie pas l'appréciation des contrastes dans notre étude.

2. Choix du test périodique. — L'objet idéal pour la mesure expérimentale du

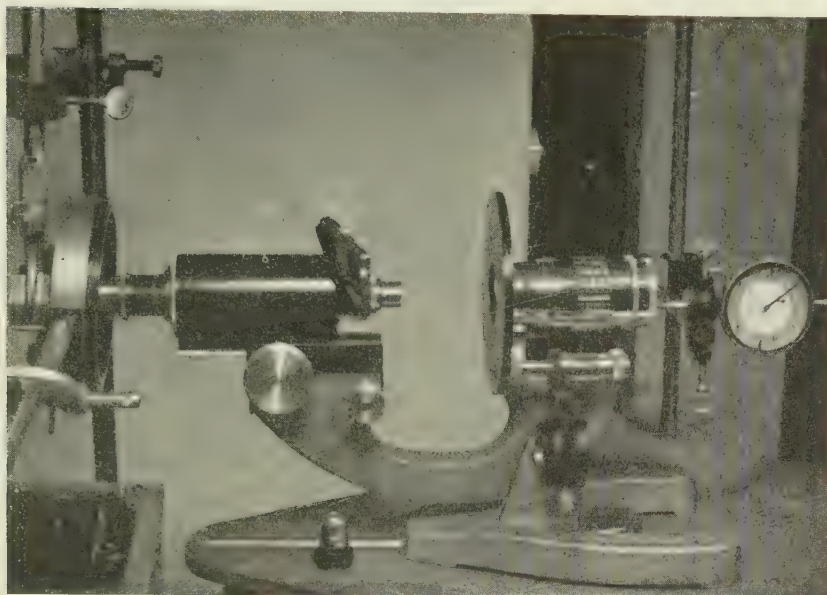


FIG. 9. — Montage de l'objectif étudié ; la montre comparateur permet de donner des faibles défauts de mise au point mesurables.

facteur de transmission des fréquences spatiales est la mire à transparence sinusoïdale $T(y) = 0,5 (1 + \sin 2\pi\mu y)$.

Si nous utilisons une mire de Foucault, la contribution des harmoniques risque de fausser les résultats : décomposons pour cela la loi de transparence de cette mire en série de Fourier :

$$T(y) = 0,5 \left[1 + \frac{4}{\pi} \sum_0^{\infty} \frac{\sin 2\pi(2p+1)\mu y}{2p+1} \right].$$

Le premier harmonique a pour valeur le tiers du fondamental ; il est de ce fait très important.

En vue de réduire l'influence des harmoniques, on peut utiliser, comme l'a fait Lohmann, une mire obtenue en croisant deux mires de Foucault identiques, de fréquence fondamentale μ_0 (figure de moiré).

Si 2θ est l'angle formé par les traits des mires, la fréquence résultante due à la superposition des deux phénomènes est $\mu = 2\mu_0 \sin \theta$.

L'intérêt des moirés est double :

- a) nous avons un système périodique à fréquence variable sans aberration ;
- b) si nous effectuons la décomposition en série de Fourier du phénomène de moirés nous obtenons, pour expression de la transparence,

$$T(y) = 0,5 \left[1 + \frac{8}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{\sin 2\pi(2p+1)\mu y}{(2p+1)^2} \right].$$

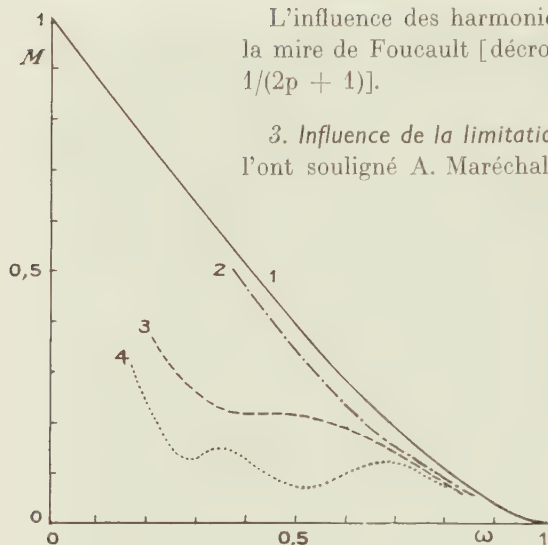


FIG. 10. — Courbe 1, objectif parfait ; courbe 2, objectif ouvert à $f/5,6$; courbe 3, objectif ouvert à $f/4$; courbe 4, objectif ouvert à $f/2,8$.

focale 50 mm, dans le domaine des hautes fréquences. L'étude a été effectuée en utilisant la radiation jaune du sodium. Nous avons porté les résultats sur la figure 10 ; en abscisse la fréquence réduite ω nous permet de représenter à la même échelle l'évolution de la qualité du système optique pour différentes ouvertures,

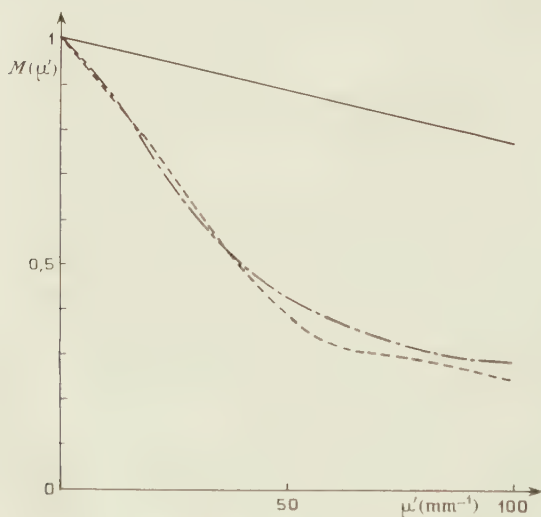


FIG. 11. — Mesure effectuée par le dispositif électronique (-----) ; mesure effectuée par le dispositif visuel (.-.-.-.-) ; objectif parfait de même ouverture (———).

L'influence des harmoniques est moins sensible que pour la mire de Foucault [décroissance en $1/(2p+1)^2$ au lieu de $1/(2p+1)$].

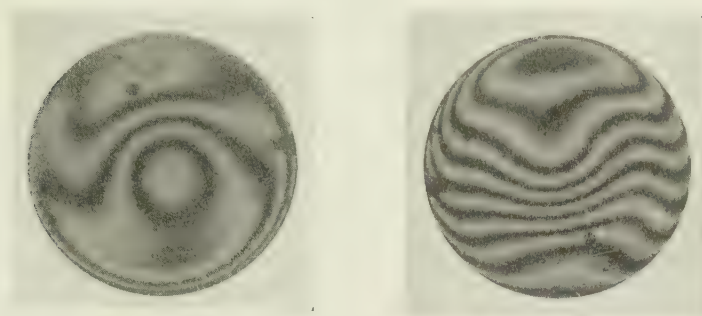
3. *Influence de la limitation du nombre de traits.* — Comme l'ont souligné A. Maréchal et P. Lacomme, la limitation du champ-objet entraîne une indétermination sur la fréquence spatiale et, par suite, une erreur sur la fonction de modulation. Les effets peuvent être réduits par une technique rappelant l'apodisation des objectifs.

4. Résultats expérimentaux.

1. *Domaine des hautes fréquences.* — En utilisant le premier montage de gradation de contraste par diffraction, nous avons étudié un bon objectif photographique, de longueur focale 50 mm, dans le domaine des hautes fréquences. L'étude a été effectuée en utilisant la radiation jaune du sodium. Nous avons porté les résultats sur la figure 10 ; en ordonnée est porté le facteur de transmission des fréquences spatiales M .

2. *Domaine des basses et moyennes fréquences.* — Le deuxième dispositif nous a permis d'examiner un objectif dans le domaine pratique de la photographie courante (c'est-à-dire pour des fréquences allant de 0 à 100 mm^{-1}). Pour effectuer cette étude, nous avons opéré sur un objectif photographique du type téléobjectif dont les caractéristiques sont les suivantes : longueur focale 90 mm, nombre d'ouverture 3,5, l'objectif est destiné à couvrir le format $24 \times 36 \text{ mm}$. Les résultats sont représentés

FIG. 12.



sur la figure 11. En ordonnée figure la modulation et en abscisse la fréquence exprimée en mm^{-1} . L'étude est faite au centre du champ en lumière monochromatique pour la radiation $5\,460\text{ \AA}$.

Pour vérifier les résultats précédemment obtenus, P. Lacomme [6], à l'Institut d'Optique de Paris, a bien voulu effectuer la mesure du facteur de modulation du même objectif et dans les mêmes conditions, à l'aide du dispositif électronique qu'il a mis au point ; nous reproduisons ses résultats (fig. 11).

Nous pouvons dire qu'il y a accord entre les deux méthodes. La légère différence provient de la difficulté d'assurer une mise au point avec une précision suffisante en passant d'un montage à l'autre.

Des mesures statistiques donnent en précision relative 2 % dans la méthode visuelle.

Pour connaître parfaitement notre objectif nous avons étudié la forme de la surface d'onde à l'aide d'un interféromètre de Twyman-Green. Nous reproduisons (fig. 12) deux clichés montrant la topographie de la déformation de la surface d'onde. Cet objectif présente un léger excentrement, ainsi qu'un résidu d'aberration de sphéricité.

3. *Influence d'un défaut de mise au point sur la fonction de modulation de l'objectif précédemment étudié.* — La fonction de modulation d'un objectif photographique évolue avec le défaut de mise au point. Afin d'étudier l'influence de ce dernier, nous avons mesuré le facteur de modulation pour différentes mises au point. Nous représentons sur le diagramme à trois dimensions, modulation M , fréquences spatiales ν' en mm^{-1} et défaut de mise au point ε en millimètres, les résultats expérimentaux (fig. 13).

L'étude théorique de l'évolution de la fonction de modulation en fonction du défaut de mise au point a été effectuée par W. H. Steel pour un objectif parfait diaphragmé par une ouverture circulaire. Il a notamment calculé l'influence d'un défaut de mise au point égal à $\lambda/4$ sur le facteur de modulation.

Fréquence spatiale réduite	}	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Perte relative de contraste		1	0,9	0,8	0,7	0,6	
		0	0,04	0,12	0,21	0,27	0,29

L'évolution de la fonction de modulation peut être mise à profit pour améliorer la précision des pointés longitudinaux.

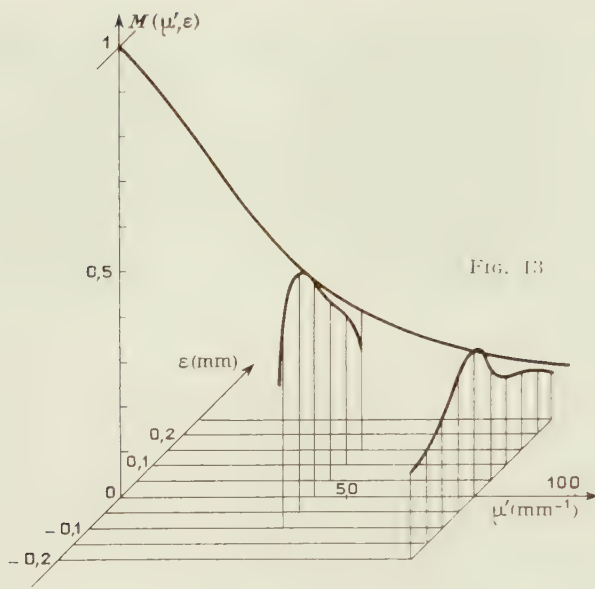


FIG. 13

III. Amélioration de la précision des pointés longitudinaux

1. Position du problème. — Le problème de la précision des pointés longitudinaux se présente de la façon suivante : étant donnés deux points A et B décalés longitudinalement et un objectif dont les performances sont limitées par la diffraction, quelle est la plus petite distance $AB = \delta x$ que l'objectif pourra déceler ?

Soit Δ l'écart normal au bord de la pupille entre l'onde sphérique centrée en B et la sphère centrée en A, α le demi-angle d'ouverture objet du système considéré ; on a, lorsque α est petit, $\Delta = \delta x \alpha^2/2$.

Posons $\Delta = \lambda/N$, où λ est la longueur d'onde utilisée et N un nombre caractérisant la précision de la méthode. Les expériences classiques utilisant le maximum de netteté donnent, dans les meilleures conditions, une précision correspondant à $N = 16$ [7]. Diverses méthodes [8, 9] ont été proposées pour améliorer cette précision. Nous nous proposons d'appliquer les résultats de l'analyse harmonique à la détermination des conditions optimales à réaliser pour effectuer des pointés longitudinaux.

2. Recherche des meilleures conditions de précision. — *1. Variation du facteur de contraste en fonction de la mise au point.* — Considérons un objet périodique (mire de Foucault par exemple) éclairé par de la lumière incohérente ; choisissons pour simplifier l'exposé un objectif diaphragmé par une ouverture rectangulaire dont un côté est parallèle aux traits. L'évolution de la fonction de modulation avec défaut de mise au point a été étudiée par H. H. Hopkins [10] et W. H. Steel [11] dans le cas général d'un système à deux dimensions. Si μ' est la fréquence spatiale, β' la variable d'ouverture des faisceaux et si ε mesure le défaut

de mise au point, la fonction de modulation s'exprime par la relation

$$M(\mu') = \frac{\int_{-[\alpha' - (\lambda\mu'/2)]}^{\alpha' - (\lambda\mu'/2)} F\left(\beta' - \frac{\lambda\mu'}{2}\right) F^*\left(\beta' + \frac{\lambda\mu'}{2}\right) d\beta'}{\int_{-\alpha}^{+\alpha} F(\beta') F^*(\beta') d\beta'}.$$

La répartition des amplitudes complexes sur la pupille de sortie $F(\beta')$ est liée simplement à l'écart normal $\Delta(\beta')$ entre l'onde émergente et la sphère de référence :

$$F(\beta') = \exp i \left[\frac{2\pi}{\lambda} \Delta(\beta') \right].$$

Dans le cas d'un objectif parfaitement corrigé des aberrations mais présentant un léger défaut de mise au point ε , l'écart normal s'exprime par la relation

$$\Delta(\beta') = \varepsilon \beta'^2 / 2,$$

le demi-angle d'ouverture des faisceaux étant supposé petit.

Le calcul de la fonction de modulation en présence d'un défaut de mise au point conduit à l'expression

$$M(\mu', \varepsilon) = \frac{\sin \left[2\pi \mu' \alpha' \left(1 - \frac{\lambda \mu'}{2\alpha'} \right) \varepsilon \right]}{2\pi \mu' \alpha' \varepsilon}.$$

En introduisant la fréquence réduite $\omega' = \lambda \mu' / 2\alpha'$,

$$M(\omega', \varepsilon) = \begin{cases} \sin \frac{4\pi \varepsilon \alpha'^2 \omega' (1 - |\omega'|)}{\lambda} \bigg/ \frac{4\pi \varepsilon \alpha'^2 \omega'}{\lambda} & \text{si } |\omega'| \leq 1 \\ 0 & \text{si } |\omega'| > 1. \end{cases}$$

Cette fonction s'annule une première fois lorsque l'argument prend la valeur $\pm \pi$, c'est-à-dire pour un défaut de mise au point $|\varepsilon| = \lambda / 4\alpha'^2 \omega' (1 - |\omega'|)$, avec $0 \leq |\omega'| \leq 1$.

L'étude de la fonction $\varepsilon(\omega')$ montre l'existence d'un minimum atteint pour la fréquence 0,5 ; pour améliorer la précision des pointés, l'on a intérêt à utiliser un objet périodique dont la fréquence fondamentale est voisine de α'/λ . La figure 14 représente l'évolution de la fonction de modulation avec défaut de mise au point.

2. Un nouveau critère de mise au point. — La méthode clas-

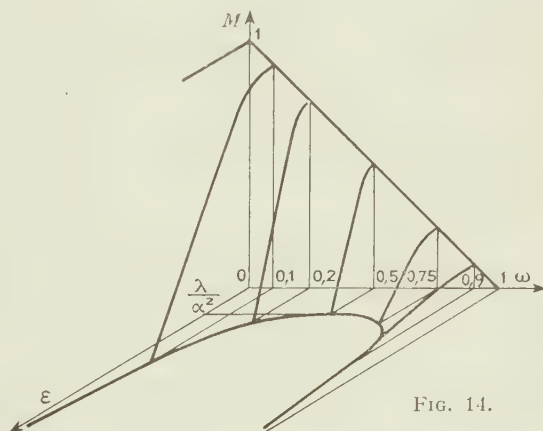


FIG. 14.

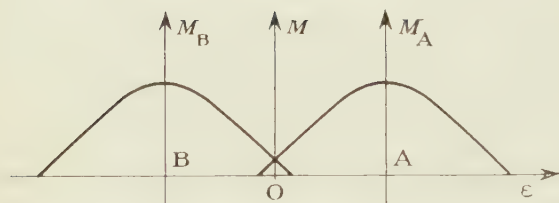


FIG. 15. — Evolution du contraste de l'image de deux mires identiques décalées en profondeur.

sique de pointé longitudinal consiste à rechercher le maximum de contraste de l'image ; dans ces conditions l'observateur se place dans une région où la fonction de modulation est stationnaire, de ce fait l'indétermination est assez grande. Nous suggérons d'améliorer la précision en se plaçant dans des conditions où le facteur de contraste varie très rapidement et où les propriétés de l'œil soient utilisées au mieux. On utilise l'aptitude de l'œil à apprécier l'égalité du contraste de deux plages voisines. Nous avons réalisé à cet effet le montage suivant : deux mires de Foucault dont la fréquence spatiale est égale à la moitié de la fréquence de coupure sont décalées en profondeur ; l'image de la première occupe le demi-champ supérieur de l'objectif et l'image de la seconde le demi-champ inférieur ; l'axe de la périodicité est parallèle à la ligne de séparation des champs. Si la mise au point est effectuée à mi-chemin entre les deux mires, les contrastes des images sont égaux (fig. 15) puisque les courbes représentant les fonctions de modulation des deux mires se coupent pour cette mise au point.

Décalons la mise au point d'une petite quantité positive $\delta\epsilon$; le contraste de l'image de la mire B diminue, celui de la mire A augmente, l'égalité des contrastes est détruite ; la méthode est très sensible dans la zone où la pente est maximum, c'est-à-dire au voisinage du zéro de la fonction de modulation.

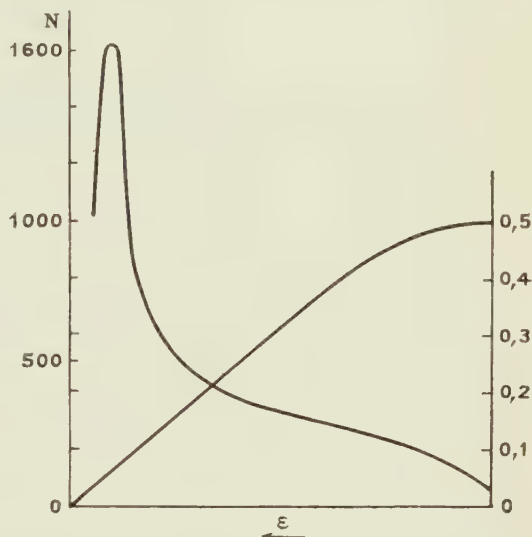
Il est nécessaire, d'autre part, de faire intervenir les propriétés du récepteur. Nous n'envisagerons que le cas de l'œil ; il intervient par deux effets :

a) le seuil de contraste perceptible dépend du diamètre de la pupille utilisée et de l'éclairement rétinien, il augmente très rapidement dès que le diamètre pupillaire est inférieur à 0,5 mm [12] ;

b) le parcours d'accommodation de l'œil est nuisible à la précision des mesures ; son influence peut être réduite en utilisant un instrument d'observation dont la pupille de sortie est suffisamment petite, comme l'ont démontré A. Arnulf & M. Françon [13]. Ainsi, pour obtenir une précision visuelle de pointé chiffrée en écart normal de $\lambda/1\,000$, l'observateur étant autorisé à avoir un parcours d'accommodation de $1\,\delta$, on doit utiliser une pupille instrumentale inférieure à 0,07 mm. Dans ces conditions l'observation est rendue gênante par la présence des images entoptiques.

Nous avons réalisé un montage expérimental dont les caractéristiques sont les suivantes : les mires-objets ont un pas de 0,293 mm, elles sont éclairées par une lampe à vapeur de sodium et situées à 7 m d'un objectif de 600 mm de longueur focale ; il est diaphragmé par une pupille rectangulaire de 28 mm ; l'image obtenue est agrandie à l'aide d'un objectif de microscope ($\times 10$). Pour effectuer la mise au point, nous laissons tous les éléments fixes, nous déplaçons l'oculaire d'observation ; un repère lié à cet oculaire permet de mesurer la précision des pointés.

Fig. 16. — Influence du contraste de l'image sur la précision des pointés. En ordonnées : à droite, contraste de l'image ; à gauche, paramètre N caractérisant la précision des pointés. En abscisse, défaut de mise au point permettant d'obtenir la variation du contraste de l'image.



3. **Résultats obtenus.** — La précision des pointés, chiffrée en écart normal λ/N à la surface d'onde, a été exprimée à partir des mesures effectuées en déplaçant l'oculaire par la moyenne du module de l'erreur $\delta x' = |x'_1 - \bar{x}'_1|$. Cette étude a été faite pour une pupille de sortie de 0,06 mm et pour différentes distances séparant les mires-objets. Nous résumons les résultats sur la figure 16.

Il est remarquable de constater l'influence du test-objet sur la précision ; ainsi, pour un défaut de mise au point nul, c'est-à-dire en opérant par la méthode classique de pointé par netteté sur une mire de Foucault, le seul fait d'avoir bien choisi le pas de la mire donne une précision de $\lambda/60$.

Cette méthode de précision des pointés longitudinaux peut être évidemment appliquée aux problèmes classiques d'optique : mesures des longueurs, contrôle de la qualité d'une lame à faces parallèles, etc. D'autre part, l'application de cette méthode à la réalisation d'un comparateur permet d'espérer une précision longitudinale de pointé de 20 Å en utilisant un objectif de microscope d'ouverture numérique 0,8.

L'amélioration effectuée ne porte que sur un choix judicieux de l'objet et un critère de mise au point différent. Nous disposons d'autres possibilités pour perfectionner la méthode :

a) choix de l'indice de réfraction du milieu-objet, le gain est faible en comparaison des causes d'erreurs éventuelles dues aux effets de capillarité ;

b) action de l'objectif, nous pouvons agir sur la transparence et la répartition des phases dans la pupille dans le but d'obtenir une évolution plus rapide de la fonction de modulation pour un défaut de mise au point donné ;

c) choix du récepteur, nous pouvons utiliser un récepteur physique plus sensible que l'œil à la variation de contraste.

IV. Conclusion

L'analyse harmonique appliquée à l'optique donne une meilleure connaissance de la formation des images d'objets étendus en lumière incohérente.

La méthode de mesure du module du facteur de transmission des fréquences spatiales proposée est simple dans sa réalisation ; elle convient parfaitement à l'étude d'un prototype avant son exécution en série. La mesure du facteur de contraste étendue à l'ensemble du champ ne présente pas de difficulté importante. Une mécanique précise doit être réalisée pour matérialiser le plan d'appui du film perpendiculaire à l'axe optique de l'objectif étudié.

L'amélioration des pointés longitudinaux par l'utilisation de l'égalité des contrastes peut être aisément employée en métrologie. La seule difficulté réside dans la réalisation d'un objet-test plus compliqué que dans la méthode de pointé par netteté.

Ce travail a été effectué à l'Institut d'Optique, sous la conduite de M^r le Professeur A. Arnulf. Je le remercie très vivement pour ses conseils, ses suggestions et sa constante bienveillance.

J'exprime toute ma gratitude à M^r le Professeur A. Maréchal pour les critiques et l'aide qu'il a bien voulu m'apporter au cours de nombreuses discussions.

RÉFÉRENCES

- [1] P. M. DUFFIEUX, L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique, chez l'Auteur, Univ. Besançon, 1946.
- [2] A. MARÉCHAL, Optique géométrique générale, Handbuch der Physik, t. 24, éd. Springer, Berlin, 1956.
- [3] A. ARNULF, La vision dans les instruments, éd. *Rev. Opt.*, Paris, 1937.
- [4] J. W. T. WALSH, Photometry, éd. Constable, London, 1926.
- [5] Y. LE GRAND, Optique physiologique, t. 2, éd. *Rev. Opt.*, Paris, 1948.
- [6] P. LACOMME, *Acta electronica*, t. 2, 1958, p. 263.
- [7] M^{lle} O. DUPUY, *C. r. Ac. Sc.*, t. 250, 1960, p. 97.
- [8] M^{lle} B. DOSSIER, P. JACQUINOT, A. MARÉCHAL & G. PIEUCHARD, *Jl Phys.* [8], t. 12, 1951, p. 142 et 565.
- [9] M^{lle} O. DUPUY, *C. r. Ac. Sc.*, t. 250, 1960, p. 1013.
- [10] H. H. HOPKINS, *Proc. Royal Soc. [A]*, t. 231, 1955, p. 91.
- [11] W. H. STEEL, *Opt. Acta*, t. 3, 1956, p. 65.
- [12] A. ARNULF & M^{lle} O. DUPUY, *C. r. Ac. Sc.*, t. 223, 1949, p. 1057.
- [13] A. ARNULF & M. FRANÇON, Mesures optiques, t. 1, Inst. Opt., Paris, 1947.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

La spectroscopie interférentielle

Vu et approuvé :

Paris, le 12 Juin 1960

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

J. PÉRÈS.

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

Jean SARRAILH.

